

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Факультет електроніки

(повна назва факультету / інституту)

Кафедра мікроелектроніки

(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

(підпис)

(ініціали, прізвище)

“ ” 20__ р.

Дипломний проект

на здобуття ступеня бакалавра

з напрямку підготовки 6.050801. «Мікро- та наноелектроніка»,
(код і назва)

на тему: Керований резонансний інвертор великої потужності

Виконав (-ла): студент (-ка) 4 курсу, групи ДП-51
(шифр групи)

Мкртчян Данііл Олександрович
(прізвище, ім'я, по батькові) (підпис)

Керівник професор, Бросисов Олександр Васильович
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Консультант з технологічних питань доктор фіз.мат. наук, Королук Дмитро
Володимирович
(назва розділу) (науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали) (підпис)

Консультант з нормоконтролю доц., к.т.н., Орлов А. Т.
(назва розділу) (науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали) (підпис)

Консультант з інформаційних питань ст. викл., к.т.н. Діденко Ю. В.
(назва розділу) (науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали) (підпис)

Рецензент _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Засвідчую, що у цій дипломній роботі немає запозичень
з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент _____
(підпис)

Київ – 2019__ року

РЕФЕРАТ

Дипломна робота виконана на 53 сторінках, вони містять 3 розділи, 30 ілюстрацій та 26 джерел в переліку посилань.

Об'єктом дослідження є керований резонансний інвертор великої потужності.

Предметом дослідження є прототипація схемотехнічних рішень керованого резонансного інвертора потужністю до 2 кВт

Метою роботи є розробка схем керованого резонансного інвертора потужністю до 2 кВт, для розігріву обмежених мас металів.

В першому розділі розглянуті теоретичні відомості індукційної плавки, суть методу, основні параметри плавки, які впливають на ефективність роботи. Також розглянута конструкція та роботи індукційної печі. У другому розділі проведені симуляційні моделювання сигналів та побудова оснвних схем інвертора . Третій розділ присвячений розгляду можливості застосування керованого резонансного інвертора.

РЕФЕРАТ

ABSTRACT

The work presented on 53 pages consists of 3 parts, 30 figures and 26 sources in the list of references.

The subject of the research is the prototype of circuit engineering solutions of a controlled resonant inverter with power up to 2 kW.

The purpose of the work is to develop schemes of a controlled resonant inverter with a power of up to 2 kW, for heating of the limited masses of metals.

In the first section we consider theoretical information of induction smelting, essence of the method, main parameters of the smelting, which affect the efficiency of work. Also, the design and operation of the induction furnace are considered. In the second section simulation simulations of signals and the construction of the ground circuit inverter. The third section is devoted to the possibility of using a controlled resonant inverter.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
1.АНАЛІЗ МЕТОДУ ІНДУКЦІЙНОГО РОЗІГРІВУ І ПЛАВЛЕННЯ МЕТАЛІВ.	8
1.2 Суть методу	8
1.3. Теоретичні основи	9
1.4. Устаткування для індукційного нагріву	15
2.РОЗРОБКА СХЕМОТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ ПО СИСТЕМІ КЕРУВАННЯ ПАРАМЕТРАМИ ІНВЕРТОРА.....	22
2.1 Симуляційне моделювання сигналів та розширений аналіз схем прототипів.	22
2.1.1 Програма OrCAD PSpice (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis)	23
2.1.2 Експериментальний аналіз та вибір схем підмодулів інвертора.	27
2.2 Полумостовий інвертор.	34
2.3. Мостовий інвертор. Блок схема.	37
3. Можливі застосування керованого резонансного інвертора потужністю до 2 кВт.....	45
3.1. Еквівалентна схема навантаження для індукційного нагріву та плавки	46
3.2 Особливості конструкції навантаження.....	46
Висновки	49
Список літератури.....	51

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ККД – коефіцієнт корисної дії.

Е.Р.С. - електрорушійна сила.

ШІМ – широко-імпульсний модулятор

ЧІМ – частотно-імпульсний модулятор

SPICE - Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis

PSPICE - Personal Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis

MOSFET -Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor

МОН - Метал-Оксид-Напівпровідник

АТР - Автотрансформатор

ВСТУП

Інвертори - називають пристрої, зворотні до випрямлячів, тобто які перетворюють постійну напругу в змінну. Іншими словами термін «інвертор» можна сформулювати : генератор змінної напруги, що використовується в якості джерела живлення.

Таким чином, інвертор - це генератор напруги, яка періодично змінюється. при цьому форма напруги може бути синусоїдальною, наближеною до синусоїдальної або імпульсною. Інвертори застосовують як в якості самостійних пристроїв, так і в складі систем безперебійного електропостачання.

Вимоги до інверторів, як і до інших силових пристроїв, включають: високий ККД та надійність. Одне з найважливіших переваг це - як можна менші габаритні розміри і вага. Також необхідно щоб інвертор витримував допустимий рівень вищих гармонік у вхідній напрузі, і не створював неприйнятно сильних імпульсних перешкод для споживачів.

Швидкий розвиток і здешевлення компонентів електроніки посприяло тому що, майже всі класи інверторів широко використовуються вже навіть в побуті, наприклад - побутові індукційні електроплитки. У промисловості - це імпульсні блоки живлення великої потужності сучасних ПК, зварювальні інвертори, електронні баласты для люмінесцентних ламп. Розповсюдженість і доступна ціна транзисторних інверторів також могли б сприяти більш широкому їх використанні для індукційного розігріву феро- і діамагнітних матеріалів.

На сьогоднішній день постає питання модерних хімічних реакторів для синтезу спеціальних матеріалів, які потребують створення засобів індукційного розігріву хімічних агентів до температур 1500 С з керованим рівнем температур та градієнтів. Саме керований резонансний інвертор

великої потужності може лежати в основі дії даних реакторів. Розробка схемотехнічних рішень по системі керування параметрами інвертора – найголовніше питання в даній роботі. Специфіка таких рішень полягає у принципі керованої перебудови робочої частоти інвертора для управління потужністю, що передбачає неможливість застосування ШІМу.

На ринку у вільному продажі резонансний інвертор великої потужністю (1-2 кВт) з керованою частотою перетворення до 200-400 кГц – знайти практично неможливо. А якщо якісь прототипи існують то ціна на них буде дуже великою. Інвертори відсутні в продажу по деяким вагомим причинам.

Для того щоб такий інвертор вийшов на серійне виробництво потрібно докласти немало зусиль до його розробки. Також, таким резонансним інверторам не знайшлось поки що безпосереднього застосування в побуті, тому компаніям по виробництву побутової техніки раціональніше і вигідніше використовувати окремо для кожної галузі спеціалізовані рішення (кухонна індукційна піч, зварювальний апарат, джерела безперебійного живлення).

В даній роботі постає питання, щодо розробки схемотехнічних рішень керованого резонансного інвертора, який буде використовуватись для розігріву і плавки обмежених мас металів, тому універсальність і гнучкість приладу будуть одним з найважливіших критеріїв. Тому акцент під час розробки був поставлений саме на унікальність і універсальність рішень.

З урахуванням цих міркувань були розроблені схемотехнічні прототипації лабораторного інвертора. Інвертор може працювати в діапазоні частот 60-300 кГц, потужність (для напівмоста) - до 2 кВт. Всі модулі та основні технічні деталі розглянуті з деталізацією, достатньою для відтворення пристрою будь-яким кваліфікованим експериментатором, які не мають спеціальної підготовки в області силових електроніки. В кінці роботи наводяться приклади практичного використання макета для нагріву і плавки.

Робота має на меті прототипацію схемотехнічних рішень печі індукційного розігріву обмежених мас металів на основі керованого резонансного інвертора великої потужності з модулем керування на основі мікросхеми IR2153.

1.АНАЛІЗ МЕТОДУ ІНДУКЦІЙНОГО РОЗІГРІВУ І ПЛАВЛЕННЯ МЕТАЛІВ.

1.1 Область застосування

Індукційний нагрів використовується для надчистою безконтактної плавки, термообробки, попереднього розігрівання перед пайкою та зварюванням металу, паяння твердим і м'яким припоєм, герметизації, гарячого пресування та ін. – у виробництві та науково-дослідницькій роботі.

Індукційний нагрів сталевих заготовок часто використовують і для термообробки, наприклад - загартування. Загартування проводиться з метою підвищення твердості поверхневих шарів зі збереженням «м'якої» серцевини, що досягається при нагріванні поверхневих шарів і швидкому охолодженні в повітряному, масляній або водяному середовищі.

1.2 Суть методу

Під індукційним розуміють нагрів при безконтактній передачі електроенергії в заготовку електромагнітним полем, що виникають навколо провідника, по якому тече змінний струм.

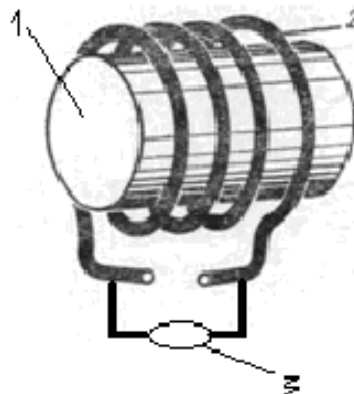


Рисунок 1.1. - Схема індукційного нагріву

Індукційний нагрів характеризується тим, що при проходженні електричного струму від джерела живлення (3) через мідну котушку - індуктор (2) електрична енергія перетворюється в енергію змінного магнітного поля, яке впливає на нагрівається металеву заготовку (1) і наводить в ній вихрові струми (рис.1.1). У тих ділянках заготовки, де циркулюють вихрові струми, тепло виділяється за методом опору відповідно до закону Джоуля-Ленца, а інша частина металу отримує тепло в результаті теплопровідності.

1.3. Теоретичні основи

Індукційний нагрів металів заснований на двох фізичних законах: законі електромагнітної індукції Фарадея-Максвелла і законі Джоуля-Ленца

Для методу індукційного нагріву значення електромагнітної індукції стоїть насамперед у можливості передати, електромагнітну енергію в об'єкт, який нагрівається, не вдаючись до контакт. Застосування контактів значно ускладнює процес і в ряді випадків призводить до неможливості його здійснення (наприклад, поверхневе загартування шийок колінчастих валів, деталей складної форми і т. д.).

Індукована в контурі електрорушійна сила (Е.Р.С.) може бути визначена на підставі закону електромагнітної індукції:

$$e = - \frac{d\Psi}{dt},$$

де e - миттєве значення е. р. с, В.

$\Psi = w\Phi$ - повне число потокозчеплення контуру, що складається з w витоків і пронизує магнітним потоком Φ , Вб.

Наведене вираз для числа потокозчеплення Ψ справедливо, якщо магнітні потоки всіх витків однакові, що дотримується у багатьох цікавлять нас випадках з достатньою точністю.

Якщо залежність потоку Φ від часу близька до синусоїдальної, можна для діючого значення е. р. с. написати:

$$E = 4,44f\omega\Phi$$

де Φ - амплітуда магнітного потоку, Вб,

f - частота, Гц.

Тоді потужність можна визначити з виразу:

$$P = EI \cos \varphi = 4,44f\omega I \Phi \cos \varphi$$

З рівняння видно, що потужність P при інших рівних умовах пропорційна частоті. Тому при підвищенні частоти збільшується енергія, що виділяється в тому ж самому обсязі, тобто збільшується її концентрація.

Найважливіший параметр установок індукційного нагріву - частота. Для кожного процесу (поверхневе загартування, наскрізний нагрів) існує оптимальний діапазон частот, що забезпечує найкращі технологічні та економічні показники.

Для індукційного нагріву використовують частоти від 50 Гц до 5 МГц.

Зазвичай нагрівання індукцією невеликих заготовок вимагає більш високих робочих частот (часто більших за 50 кГц), а більші заготовки ефективніше нагріваються нижчими частотами.

Робоча частота індукційного нагріву обумовлено особливе заготовки і матеріалом, з якого вона зроблена. Важливо, щоб індукційна система була здатне забезпечити струм з частотами, які відповідають потребують її застосування.

Якщо частота інвертора дорівнює резонансній частоті контуру, індуктор порожній (без навантаження) і не вжито жодних заходів для уникнення роботи в такому режимі, то інвертор буде працювати практично на КЗ. Уникнути такого режиму можна декількома способами. Один з них - постійна робота з графітовим тиглем. Другий спосіб - включення з уже

завантаженим індуктором (з заготівлею). При внесенні заготовки в індуктор, змінюється його індуктивність і резонансна частота контуру. При внесенні в індуктор феромагнетиків (сталь, залізо), резонансна частота зсувається вниз, а при внесенні діамагнетиків (мідь) - частота зсувається вгору. Наскільки сильно зміниться частота, залежить від маси і матеріалу заготовки (його магнітної проникності). Крім того, резонансна частота змінюється в міру нагрівання заготовки, оскільки магнітні властивості матеріалу залежать від його температури. Потужність, що передається на нагрів заготовки максимальна тільки на резонансній частоті. Тому при фіксованій частоті генератора можна домогтися повної віддачі потужності на нагрівання при різних масах, матеріалах і при різних ступенях нагріву заготовок.

Є кілька способів підстроювання частоти генератора в резонанс з LC-контуром:

Перший (канонічний) - за допомогою осцилографа, по відсутності зсуву фаз між струмом в контурі напругою на ньому.

Другий спосіб - пошук частоти, при якій амплітуда напруги на L або C елементах контура досягає максимальних значень (форма напруги при цьому синусоїдальна). На елементах контуру амплітуда напруги може у багато разів перевищувати напруга живлення, тому зазначену процедуру необхідно проводити при зниженій напрузі живлення інвертора і з подільником напруги.

Третій і найбільш простий спосіб - відстеження струму, споживаного інвертором в процесі регулювання частоти генератора (R9). Частота, при якій струм найбільший, є резонансною.

Для полегшення розуміння спожи в різних частотах роботи розглянемо явище, відоме як "скін-ефект". Коли електромагнітне поле утворює струм в заготівлі, він протікає в першу чергу в її поверхні. Чим вище робоча частота,

тим тонше скін-шар; чим частота нижче, тим шар глибше і тому сильніше проникнення ефекту нагріву.

Глибина скін-шару залежить від частоти випромінювання: чим вище частота, тим тонше скін-шар. Також вона залежить від відносної магнітної проникності μ матеріалу заготовки. Для заліза, кобальту, нікелю та магнітних сплавів при температурі нижче точки Кюрі μ має величину від декількох сотень до десятків тисяч. Для інших матеріалів (розплави, кольорові метали, рідкі легкоплавкі евтектики, графіт, електропровідна кераміка і т. д.) μ приблизно дорівнює одиниці. Формула для обчислення глибини скін-шару в мм:

$$\Delta = 10^3 \sqrt{\frac{\rho}{\mu \mu_0 \pi f}}$$

де $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ - магнітна постійна Гн / м,

ρ - питомий електричний опір матеріалу заготовки при температурі обробки, Ом * м,

f - частота електромагнітного поля, що генерується індуктором, Гц.

Поверхневий ефект є основою методу індукційного нагріву, особливо при поверхневому загартуванні. Він виражається в нерівномірному розподілі струму по перетину провідника, при якому найбільша щільність струму спостерігається в одній з по-поверхонь провідника

Змінний струм в перерізі провідника розподіляється нерівномірно, тому в проводі індуктора і заготівлі максимальна щільність струму буде на поверхні. У глиб провідника щільність струму зменшується по експоненті. Умовно прийнято вважати, що струм поширюється в межах певної товщини, яку називають глибиною проникнення струму δ , де виділяється 90% тепла. Значення δ залежить від частоти струму, магнітної проникності і питомої електропровідності матеріалу.

Всі метали і сплави за магнітними властивостями поділяють на дві групи: феромагнітні і парамагнітні. Феромагнітні матеріали (вуглецеві сталі, залізо, нікель і кобальт) мають високою магнітною проникністю. Парамагнітні матеріали (жароміцні і нержавіючі сталі, латунь, мельхіор тощо.) Мають магнітну проникність, близьку до магнітної проникності вакууму.

При досягненні нагрівається матеріалом температури, відповідної точці магнітного перетворення (критичної точки або точки Кюрі), значення магнітної проникності феромагнітних матеріалів зменшується в 100-200 разів і знижується до величини магнітної проникності вакууму, що супроводжується збільшенням глибини проникнення струму δ . Критичної точки того чи іншого матеріалу відповідає цілком певна температура тіла. Для сталі вона дорівнює 768 С. Тому розрізняють дві глибини проникнення струму: до точки Кюрі і після неї («гарячу» глибину проникнення струму).

Для сталі при температурах 1100-1200 ° С:

$$\delta = \frac{0,6}{\sqrt{f}} .$$

Електрична енергія, яка підводиться до індуктора, частково передається в нагріваються заготовки, а менша частина витрачається на нагрів дроту індуктора. Відношення кількості енергії, що передається в заготовку, до всієї кількості енергії, що підводиться до індуктора, називають електричним коефіцієнтом корисної дії (ККД) індуктора η . Його значення залежить головним чином від відношення діаметру заготовки d_m до глибини проникнення струму δ , тобто визначається частотою струму. Електричний ККД зростає зі збільшенням частоти і досягає граничного значення при

$$\frac{d_m}{\delta} \geq 0,6 .$$

Відношення кількості енергії, витраченої на нагрів заготовок, до кількості енергії, переданої індуктором, називають термічним або тепловим ККД η_T . Він залежить не тільки від температури і тривалості нагріву, але і від розмірів теплоотдающей поверхні. Зі збільшенням d_m величина η_T знижується.

Повний ККД індуктора: $\eta = \eta_e \eta_T$.

Характер зміни всіх трьох коефіцієнтів наведено на рис.1.2 . Повний ККД індуктора залежить від частоти струму.

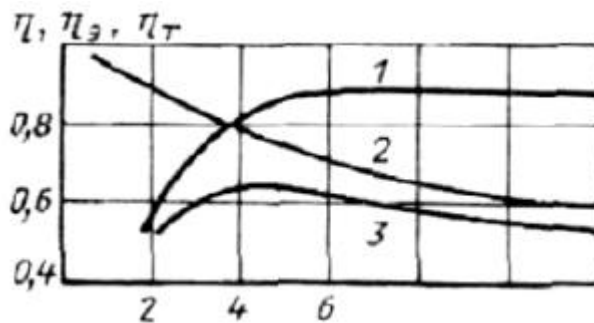


Рисунок 1.2 - Залежність електричного (1), термічного (2) і повного (3) ККД індуктора від співвідношення діаметра заготовки і глибини проникнення струму в нагріту сталь

Існують два основних способи нагріву.

Спосіб одночасного нагріву. Індуктор охоплює всю поверхню деталі, що підлягає термообробці, причому нагрів її в усіх точках відбувається одночасно. Температура поверхні та її розподіл по глибині залежать від часу нагріву і енергії, переданої в деталь за цей час .

Пристрої для наскрізного нагрівання, що працюють таким чином, зазвичай називають нагрівачами періодичної дії.

Спосіб безперервно-послідовного нагріву. Вузкий індуктор пересувається уздовж нагрівається деталі. При поверхневому загартуванні з

індуктора або спеціального пристосування, розташованого біля нього, на нагріту поверхню деталі випускається охолоджуюча її вода. У цьому випадку глибина гарту і температура поверхні визначаються швидкістю руху індуктора.

1.4. Устаткування для індукційного нагріву

Індукційний нагрівальний пристрій складається з індуктора, в якому проводиться нагрів заготовки, конденсаторної батареї, високочастотних трансформаторів. Для живлення індукційних нагрівачів застосовуються генератори струмів

Розглянемо більш докладно пристрій перерахованих елементів.

Індуктор є основним елементом індукційного нагрівального пристрою. Від геометричних розмірів і конструкції індуктора в значній мірі залежать ККД і експлуатаційні якості установки. У практиці нагріву під ковку і штампування застосовуються індуктори різної форми, яка визначається конструкцією, розмірами і розміщенням заготовок (рис. 1.3).

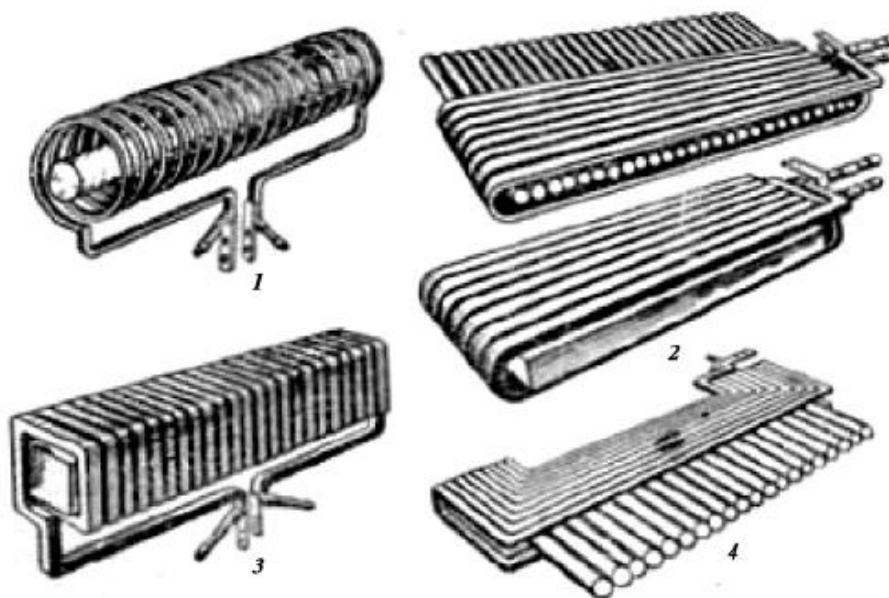


Рисунок 1.3 - Форми індукторів і розташування в них нагріваються заготовок

Для нагріву циліндричних заготовок використовуються циліндричні індуктори, виконані у вигляді соленоїда (1). При нагріві пластин або кінців ряду мірних циліндричних заготовок використовуються овальні (2) або щілинні (4) індуктори. Для нагріву заготовок квадратного поперечного перерізу застосовуються квадратні індуктори (3).

З усіх перерахованих індукторів найбільшого поширення набули циліндричні індуктори, виконані у вигляді одношарової спіралі.

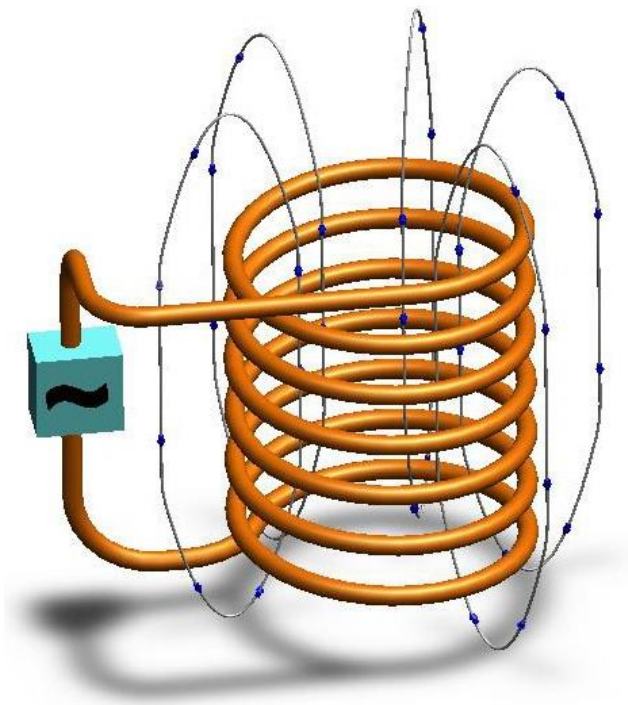


Рисунок 1.4. - Циліндричний індуктор.

Як індукуючого дроту застосовується мідна трубка квадратного або прямокутного перерізу, який охолоджується водою.

Для забезпечення охолодження індукуючого дроту при тисках води, звичайних для заводських водопроводів, трубку вибирають досить великого перерізу і поділяють її на кілька паралельних секцій. Товщина стінки трубки повинна бути не менше подвоєної глибини проникнення струму в мідь.

При відсутності мідних трубок з необхідною товщиною стінки можна використовувати смугову мідь, припаявши до неї тонкостінну мідну трубу. Трубка в цьому випадку повинна припаюватися з боку, протилежного до розташування нагрівається заготовки.

Для ізоляції індукуючого дроту застосовується скляна пряжа, мікафолієвая стрічка або міканітові шайби з радіальним розрізом.

Конденсаторна батарея служить для підвищення коефіцієнта потужності ($\cos \varphi$) нагрівальної установки і є одним з головних елементів індукційного нагрівального пристрою. Якщо індуктор виконує роль своєрідного акумулятора електромагнітної енергії, то батарея конденсаторів по суті є накопичувачем електростатичної енергії. Застосування конденсаторної батареї в індукційному нагрівачі забезпечує підвищення номінальної активної потужності генератора, що в значній мірі підвищує коефіцієнт корисної дії всієї нагрівальної установки.

Батарея конденсаторів індукційних нагрівальних пристроїв зазвичай комплектується з паперово-масляних контурних конденсаторів з водяним охолодженням

Трансформатори, застосовувані в індукційних нагрівачах, призначені для зміни напруги, що підводиться до індуктора. У практиці індукційного нагріву використовуються два типи трансформаторів: автотрансформатори та знижувальні трансформатори.

Автотрансформатор є пристроєм, що забезпечує плавне або ступеневу зміну напруги і тим самим - регулювання потужності, споживаної індуктором. Автотрансформатори застосовуються тоді, коли за умовами роботи потрібно міняти темп подачі заготовок до кувальних механізму. Розміри автотрансформатора визначаються напругою і потужністю, на які він розрахований

Понижуючі трансформатори застосовуються в практиці індукційного нагріву в тих випадках, коли напруга на індукторі у всіх випадках має бути нижче напруги на живильних шинах.

Така необхідність може виникнути, коли розрахункова кількість витків не вкладається в індукторі заданої довжини. Зменшення числа витків в даному випадку досягається зниженням напруги на вході індуктора. На відміну від автотрансформатора понижуючий трансформатор не забезпечує плавного або ступінчастого зміни напруги на виході і розрахований на постійний коефіцієнт трансформації. Обмотки і магнітопровід високочастотних понижуючих трансформаторів охолоджуються водою.

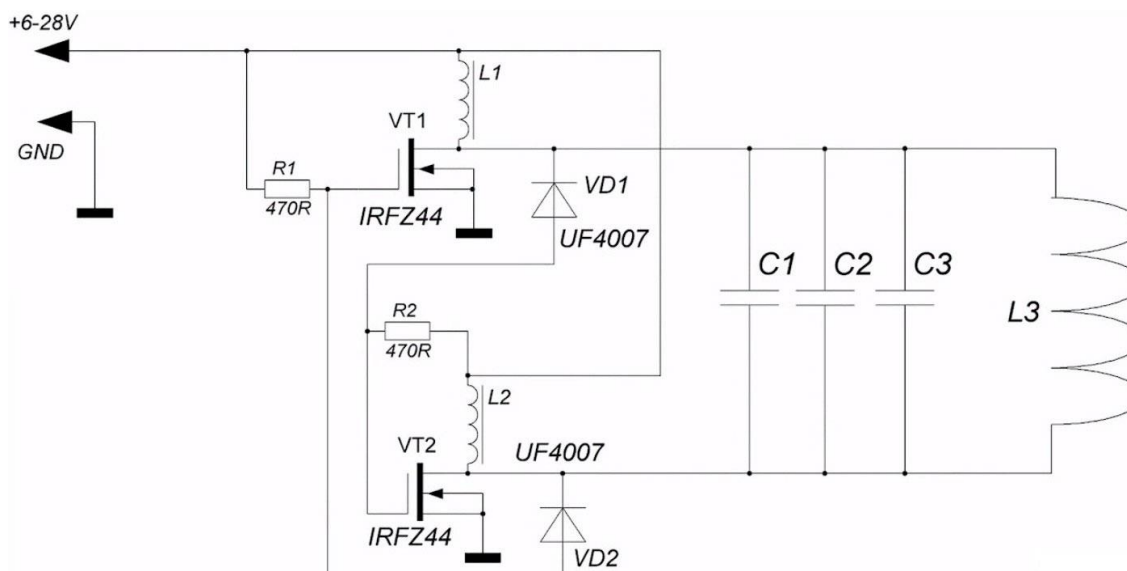


Рисунок 1.5. - Схема індукційної печі на транзисторах

1. два польових транзистора типу IRFZ44V;
2. два діода UF4007 (можна також використовувати UF4001);
3. резистор 470 Ом
4. плівкові конденсатори на 250 В: 3 штуки ємністю 1 мкФ; 4 штуки - 220 нФ; 1 штука - 470 нФ; 1 штука - 330 нФ;
5. мідний обмотувальний провід в емалевої ізоляції Ø1,2 мм;
6. мідний обмотувальний провід в емалевої ізоляції Ø2 мм;

7. два кільця від дроселів, знятих з комп'ютерного блоку живлення.

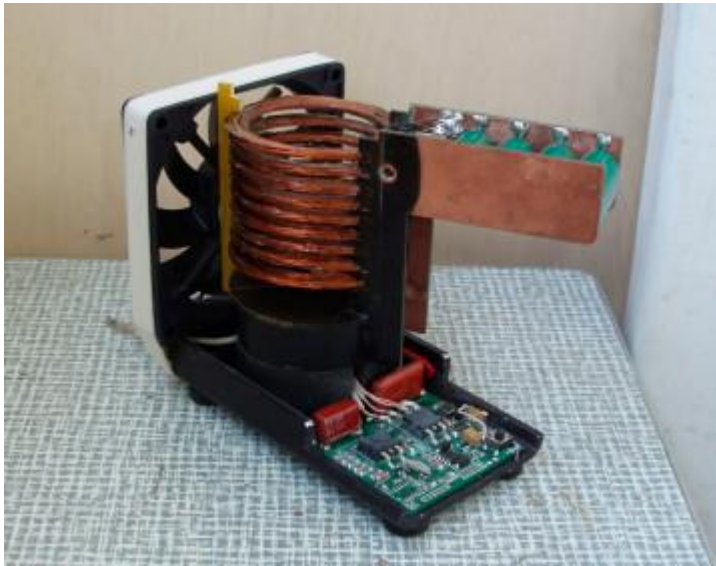


Рисунок 1.6. - Приклад готової індукційної печі

1.5. Левітаційна плавка

Левітація - метод плавки електропровідних матеріалів, зважених в змінному електромагнітному полі, відрізняється відсутністю контакту розплаву з матеріалом тигля (в ролі тигля виступає магнітне поле).

Левітаційного плавка - плавлення за допомогою індукційного нагріву невеликих зразків металу в підвішеному стані для отримання надчистих сплавів. Для цього досить підвести струм (отримуємо магніт) до вихровий трубці з мідним сердечником (щоб задати напрямом індукційним струмів).

При температурах нижче точки Кюрі, зразок утримується за рахунок взаємодії магнітного поля котушки і магнітних полів магнітних доменів. При температурі вище точки Кюрі, поле діє вже на окремі атоми рідкого металу (які утримує поруч сили поверхневого натягу). В результаті при приміщенні зразка металу в подібне поле, він утримується в повітрі, а вакуумна камера дозволить виключити дію атмосфери.

Індукційні струми, впливаючи на метал, не дають йому впасти, і нагрівають його до температури в 1200 С. Ця температура досягається за рахунок струмів Фуко, які виникають під впливом зовнішнього змінного магнітного поля.



Рисунок 1.7. - Приклад левітаційної плавки

1.6. Переваги та недоліки індукційного способу нагріву

Характерна особливість індукційного нагріву полягає в тому, що все необхідне для нагрівання заготовки тепло виникає в самій заготівлі (прямий спосіб нагріву). Ця обставина вигідно відрізняє спосіб індукційного нагріву від інших (непрямих) способів електронагріву стали і особливо від нагрівання в полум'яних печах, дозволяючи збільшити швидкість нагріву і тим самим різко скоротити втрати за рахунок випромінювання.

Іншими позитивними факторами, що вигідно відрізняють метод індукційного нагріву, є:

1) майже повна відсутність окалини, що забезпечує економію металу і впровадження в практику прогресивних технологічних процесів обробки металу тиском;

2) стабільність режиму нагріву, що дозволяє автоматизувати процеси нагрівання заготовок і подальшу їх обробку;

3) відсутність знеуглецювання поверхонь, що нагріваються заготовок і збереження механічних властивостей металу;

4) зменшення необхідної виробничої площі та значне полегшення праці робітників-штампувальників;

5) висока швидкість нагріву, що дозволяє в значній мірі підвищувати продуктивність нагрівальних пристроїв і пов'язувати їх роботу безперервним циклом з кувальними, прокатними та іншими механізмами.

До недоліку індукційного нагріву слід віднести необхідність перетворення електричного струму, що призводить до значних втрат енергії (до 30%).

Висновки до розділу

Було досконало вивчено теоретичні відомості індукційної плавки, суть методу, основні параметри плавки, які впливають на ефективність роботи. Вивчення області застосування, що дало змогу переконатися у необхідності та актуальності індукованих печей.

Також вивчена конструкція індукційної печі. Розглянуті окремо усі модулі, що входять до конструкції. Це необхідно було для створення подальшої розробки схеми інвертора, який лежить в основі роботи індукційної печі.

Розглянуто метод левітаційної плавки. Особливість цього методу в тому що, зразок який розплавляється не контактує ні з якими іншими частинами печі. Це дає змогу надчистої плавки, без потрапляння інших домішок до зразку.

Розглянуті переваги та недоліки методу індукційної плавки.

2. РОЗРОБКА СХЕМОТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ ПО СИСТЕМІ КЕРУВАННЯ ПАРАМЕТРАМИ ІНВЕРТОРА.

Досить часто для побудови інвертора застосовують основні три типи перетворювачів, а саме перетворювачі включені за схемами: асиметричний або косою міст, напівміст, а також повний міст. При цьому резонансні перетворювачі є підвидами схем напівмоста і повного моста. За системою управління дані пристрої можна поділити на: ШІМ (широотно-імпульсною модуляцією), ЧІМ (регулювання частоти), фазовий управління, а також можуть існувати комбінації всіх трьох систем.

Асиметричний міст має перелік недоліків, через які даний міст використовуватись не буде. Мостовий інвертор може підійти, але існує ризик одночасного відкриття транзисторів, результатом чого стане вихід зі строю компонентів.

Тому було вибрано інвертор включений за схемою напівміст з регулюванням частоти.

На стадії розробки схемотехнічних рішень виникає багато питань, відповіді на які простіше знайти експериментально, шляхом осцилографування сигналів в різних точках схеми.

2.1 Симуляційне моделювання сигналів та розширений аналіз схем прототипів.

Робота резонансного ідеального інвертора, виглядає досить просто, якщо він складається з ідеальних ключів. Проблеми виникають тоді, коли приступаємо до збору схем окремих модулів резонансного інвертора з

реальних компонентів. Ці проблеми можуть призвести не тільки до ускладнення схемотехнік, а й формують цілком певні вимоги до типу використовуваних компонентів, правилам компонування, запуску та налагодження. Без урахування більшості цих вимог розробити працездатні схемотехнічні рішення резонансного інвертору практично не можливе. Дорогі силові транзистори будуть виходити з ладу або відразу при включенні живлення, або в перші секунди роботи.

Тому, для рішення проблем щодо коректної роботи інвертора, в першу чергу необхідно виконати підбір оптимальних схем підмодулів та компонентів, які будуть використовуватись в загальній схемі.

Для цього треба зробити симуляційне моделювання схем підмодулів з необхідними компонентами. Далі проаналізувати та вибрати відповідні прототипи, які не будуть ускладнювати загальну схему та забезпечать коректну роботу інвертора.

Аналізи схем були проведені через осцилограми. Необхідно, щоби сигнали, які були отримані на осцилограмі досягали певної форми та набували необхідної частоти.

Симуляційне моделювання схем були зроблені у безкоштовній програмі PSpice. У наступному пункті представлений детальний опис роботи програми.

2.1.1 Програма OrCAD PSpice (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis)

Якщо потрібно виконати елементарне моделювання невеликої схеми, що містить кілька транзисторів і пасивних компонентів, то можна використовувати найпростіші безкоштовні SPICE-симулятори.

Однак більш професійні інструменти для схемотехнічного моделювання можуть дати розробникові набагато більше переваг. Якщо ознайомитися з

додатковими варіантами таких продуктів, як повний OrCAD PSpice з опцією PSpice Advanced Analysis, розробники можуть не тільки в рази скоротити свої трудовитрати при розробці нових проектів, а й заощадити багато грошей і часу для свого підприємства в цілому, підвищуючи ефективність всіх етапів проектування, виробництва і експлуатації радіоелектронної апаратури.

PSpice— програма симуляції аналогової і цифрової логіки, описаної на мові SPICE, яка призначена для персональних комп'ютерів.

Програма PSpice містить велику кількість готових бібліотек Spice-моделей і схемних символів, а крім того, в інтернеті є величезна кількість додаткових моделей - як на сайтах виробників електронних компонентів, так і на спеціалізованих порталах. Всі вони сумісні саме з PSpice.

Треба відзначити, що PSpice надає широкий набір засобів як для моделювання, так і для обробки результатів аналізу. Зручний і інтуїтивний інтерфейс схемного редактора дозволяє легко призначати моделі, встановлювати точки для контролю напруг, струмів і потужності (Рис.2.1), Користуватися формулами для побудови необхідних графіків і осцилограм, будувати графіки суміщені або розбиті по різних осях (Рис.2.2).

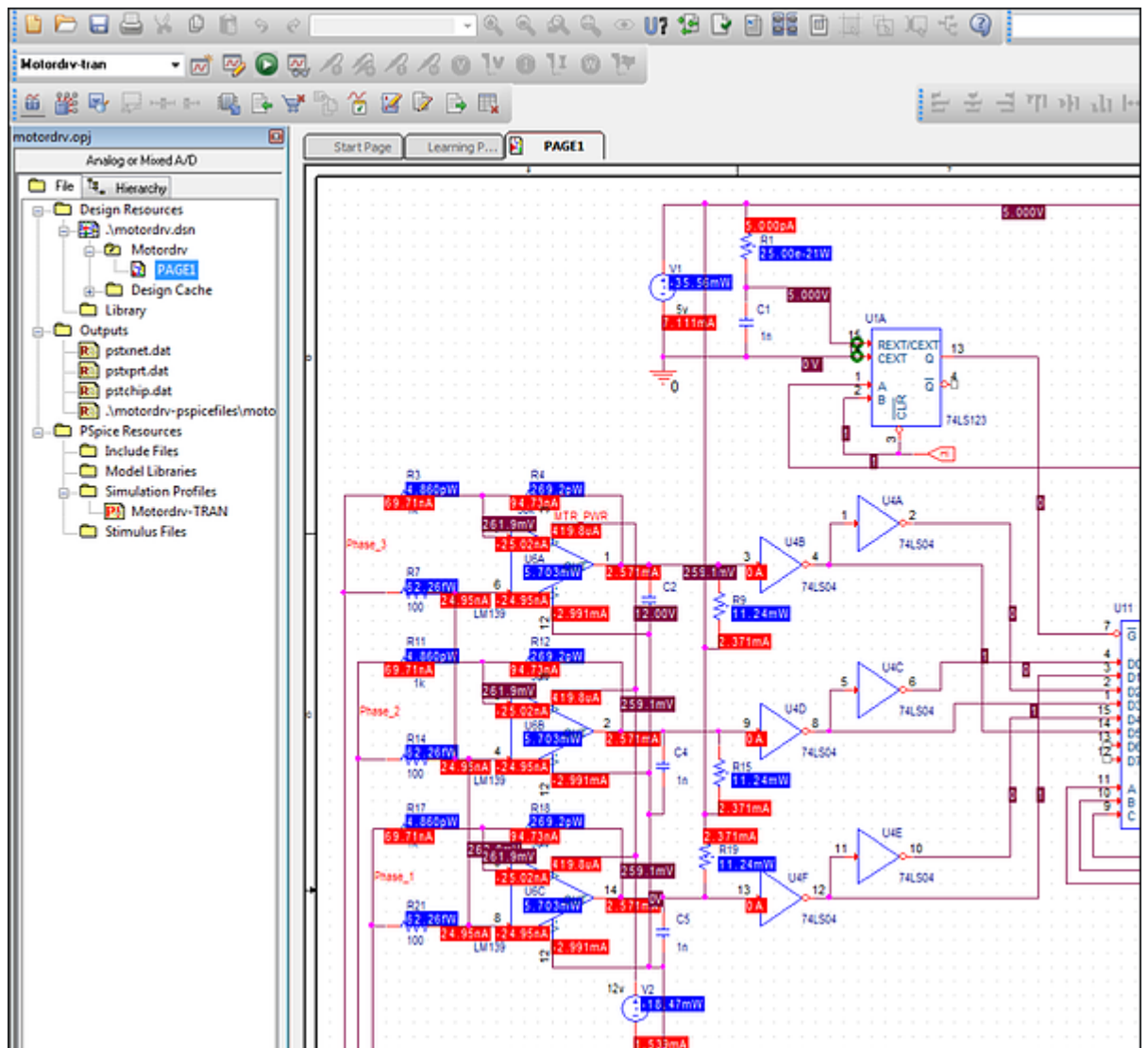


Рисунок.2.1. - Схема в редакторі OrCAD Capture з результатами моделювання вузлових напруг і струмів, отриманими в PSpice.

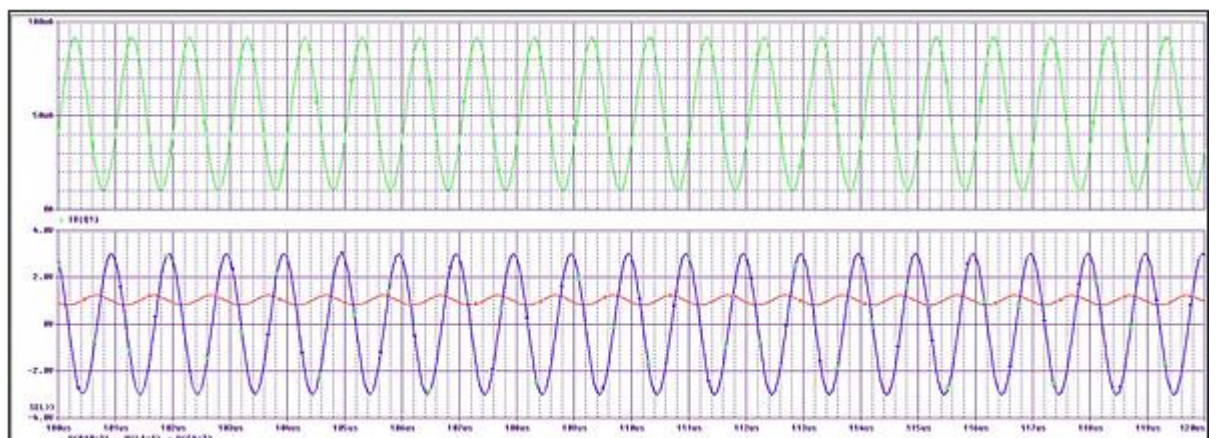


Рисунок.2.2. Приклад осцилограм, отриманих в PSpice - як на одному графіку, так і в різних осях.

У бібліотеках програми є більш 33000 компонентів зі Spice-моделями аналогових і цифрових компонентів.

Ці бібліотеки не вимагають додаткової установки, вони встановлюються відразу ж. Спеціальна панель PSpice Part Search в схемном редакторі OrCAD Capture дозволяє здійснювати миттєвий пошук необхідних компонентів. Компоненти відображаються за категоріями або по бібліотеках, у кожного є найменування (Part Name) і опис (Description). При виборі бібліотечного компонента можливий попередній схемного символу. Також користувачі можуть додавати власні компоненти в бібліотеку.

У PSpice можна виконувати різні види аналізу схем :

1. Аналіз по постійному струму
2. Аналіз по змінному струмі
3. Аналіз шумів
4. Аналіз перехідних процесів
5. Фур'є-аналіз
6. Параметричний аналіз
7. Температурний аналіз
8. Аналіз розкиду параметрів методом Монте-Карло
9. Аналіз чутливості методом найгіршого випадку
10. Аналіз передавальної функції

У PSPICE є редактор моделей індуктивних компонентів Magnetic Parts Editor - спеціальна програма для створення моделей трансформаторів, дроселів і індуктивностей.

В цілому опція PSpice Advanced Analysis пропонує розробникам електронної апаратури вкрай корисні й зручні інструменти, що дозволяють істотно підвищити якість схем, скоротити терміни розробки і прискорити вихід на серійне виробництво високоякісних і надійних приладів. У

поєднанні з недорогою, але потужною САПР друкованих плат OrCAD і її більш просунутою версією Allegro PCB Editor ці інструменти дозволяють швидко виходити на ринок, створюючи високорентабельну продукцію в найкоротші терміни.

2.1.2 Експериментальний аналіз та вибір схем підмодулів інвертора.

За час підбору оптимальних схем були перебрані сотні підмодулів з різноманітними компонентами. Проведено симуляційне моделювання сигналів у контрольних точках та розширений аналіз схем прототипів. Також зроблений аналіз підмодулів за допомогою отриманих осцилограм.

Деякі приклади підмодулів та їх осцилограми наведені нижче на рис 2.3 – 2.

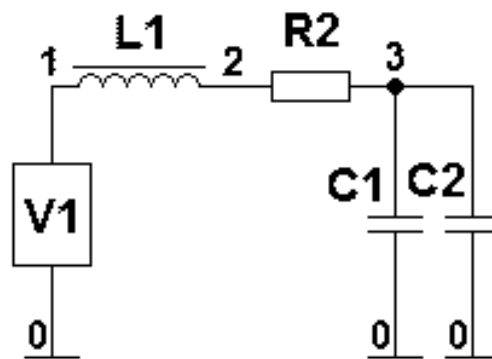


Рисунок 2.3 – Підмодуль схеми керування

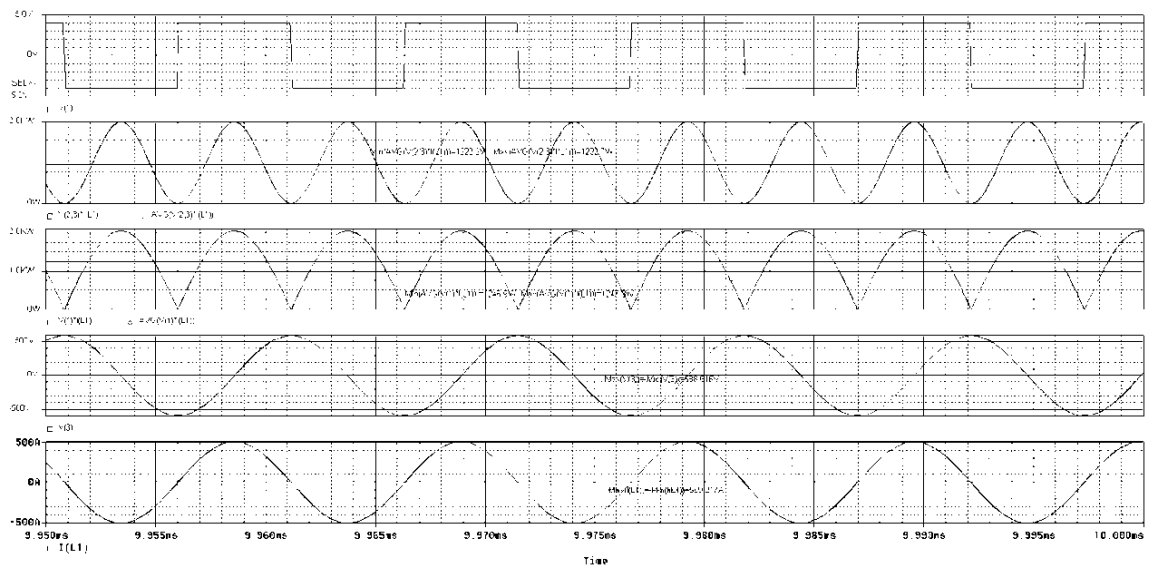


Рисунок.2.4 – Отримана осцилограма підмодуля.

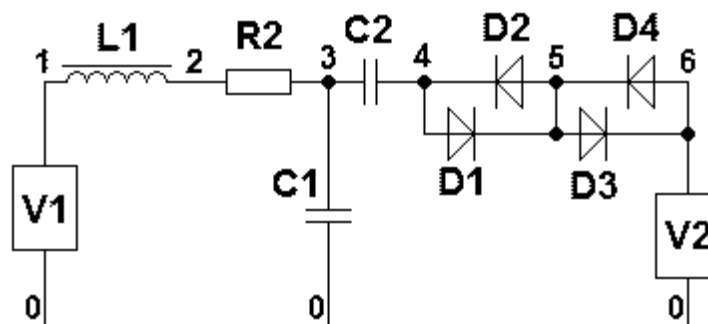


Рисунок 2.4 – Підмодуль схеми керування

V1 – генератор з періодом 10,328 мкс або частотою 96, 87 кГц та амплітудою 4В.

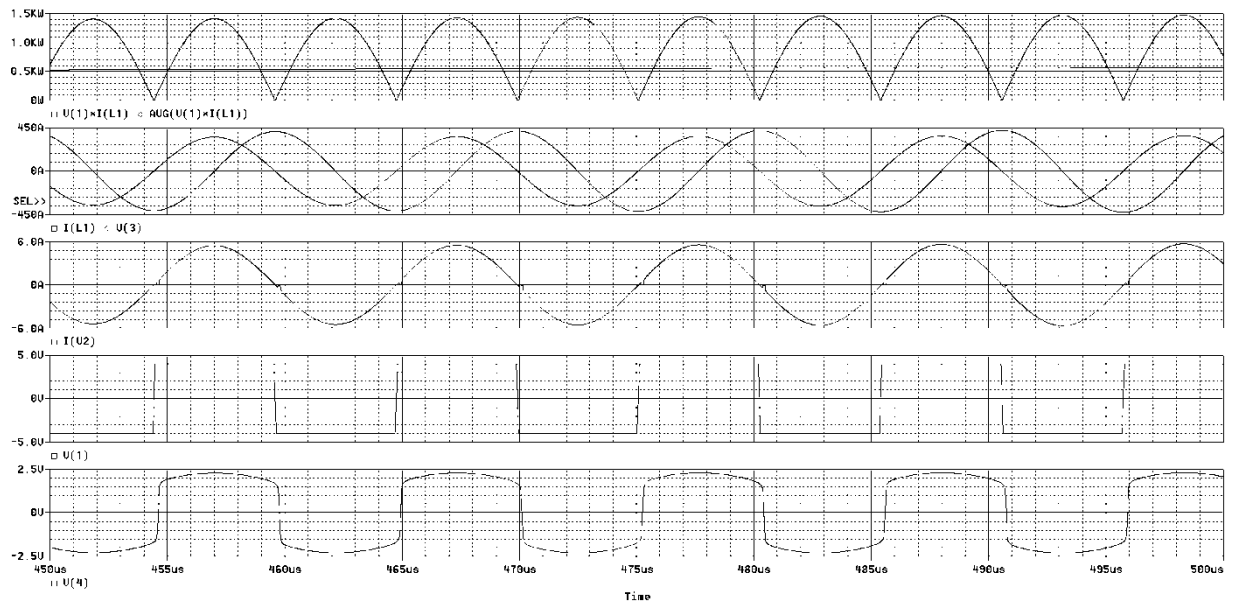


Рисунок.2.5 – Отримана осцилограма підмодуля.

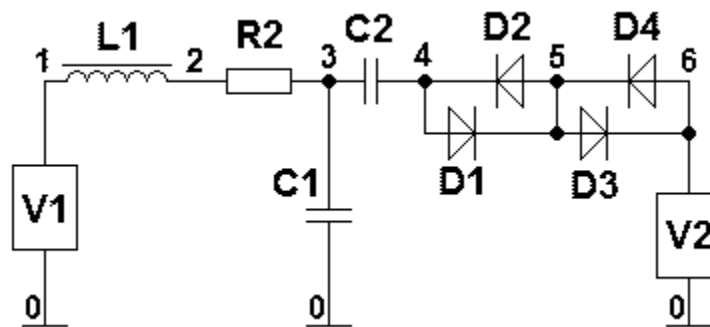


Рисунок 2.6 – Підмодуль схеми керування

V1 – генератор з періодом 10,328 мкс або частотою 96, 87 кГц та амплітудою 4В.

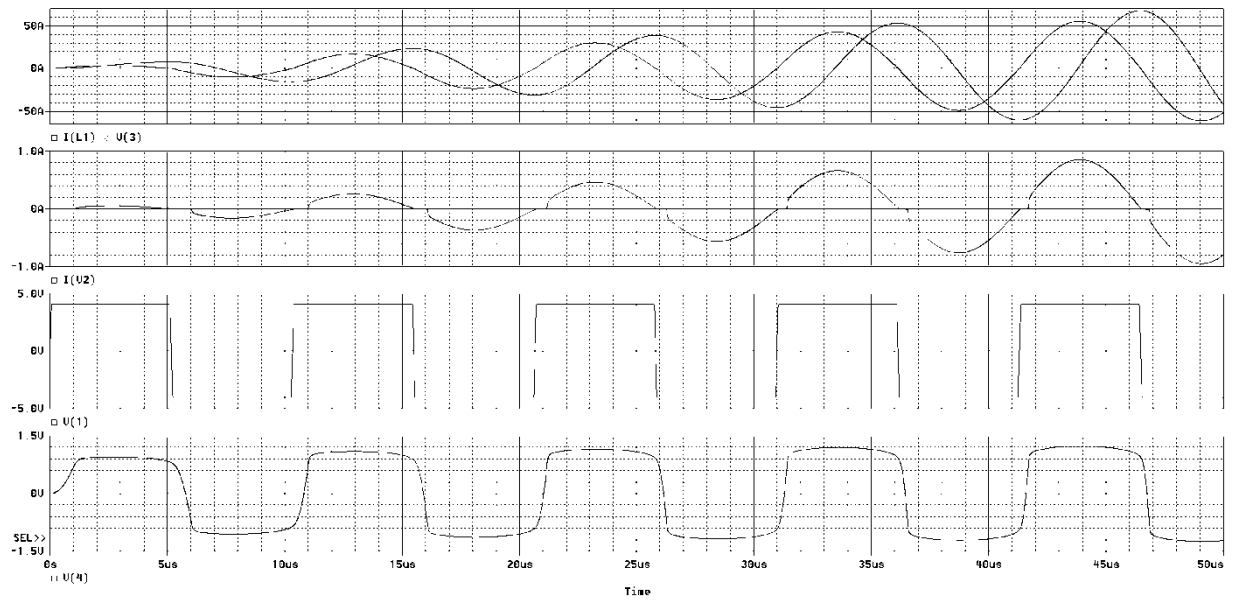


Рисунок.2.7 – Отримана осцилограма підмодуля.

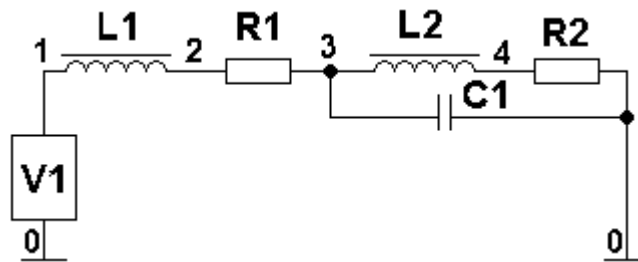


Рисунок 2.8 – Підмодуль схеми керування

V1 – генератор з періодом 10,328 мкс або частотою 96, 87 кГц та амплітудою 4В.

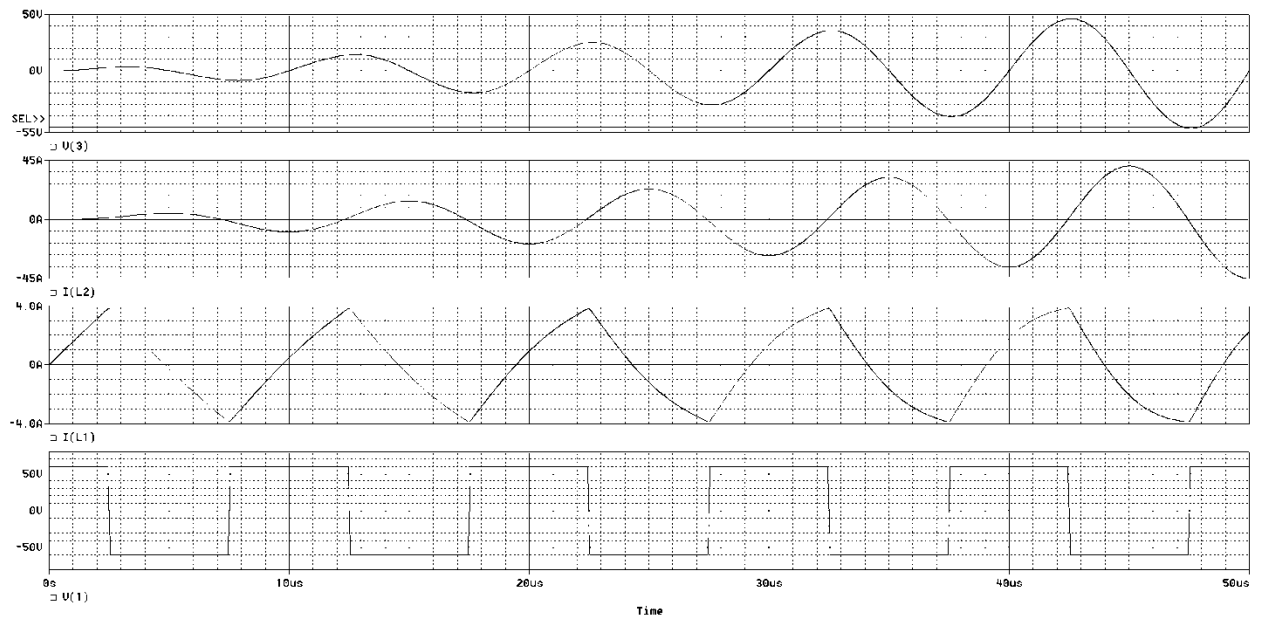


Рисунок.2.9 – Отримана осцилограма підмодуля.

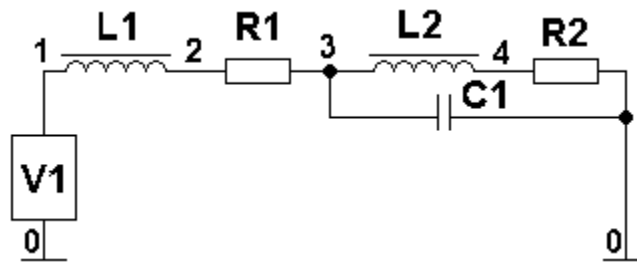


Рисунок 2.10 – Підмодуль схеми

V1 – генератор з періодом 9,0 мкс або частотою 110,7 кГц та амплітудою 4В.

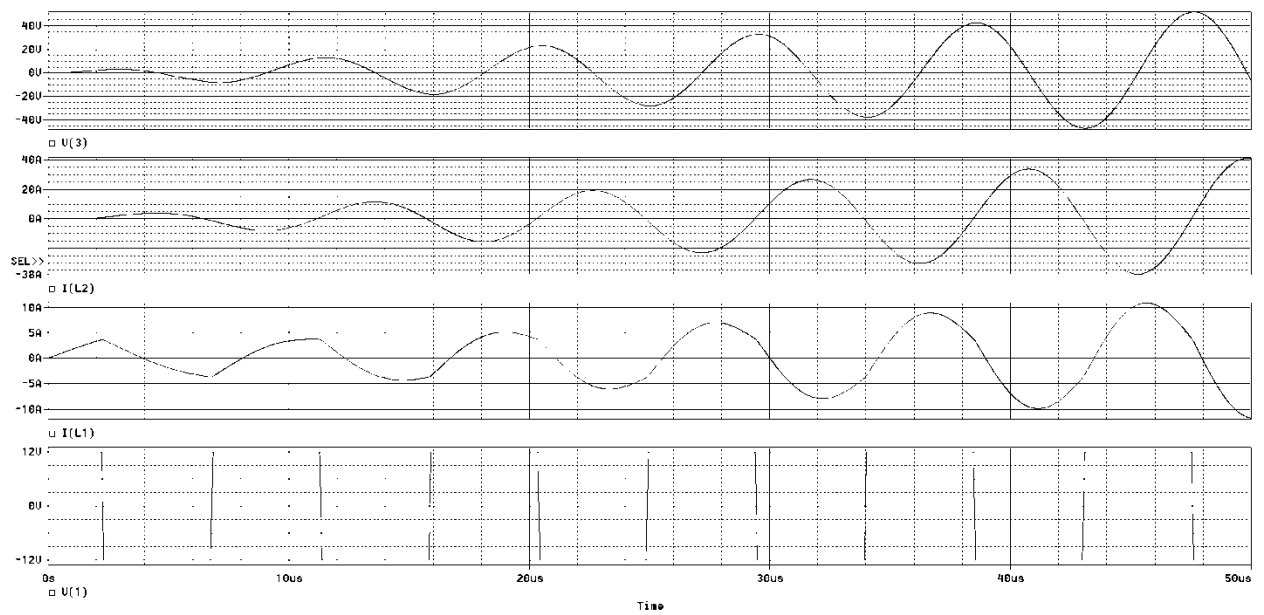


Рисунок.2.11– Отримана осцилограма підмодуля.

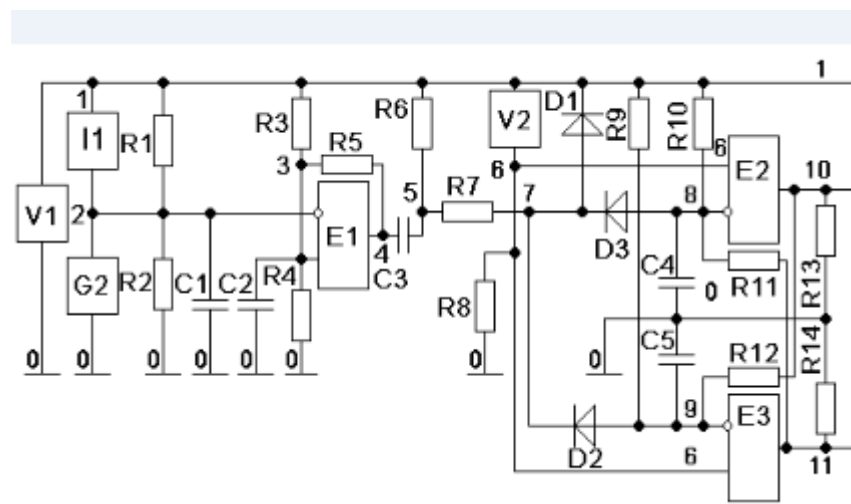


Рисунок 2.12 – Підмодуль схеми інвертора

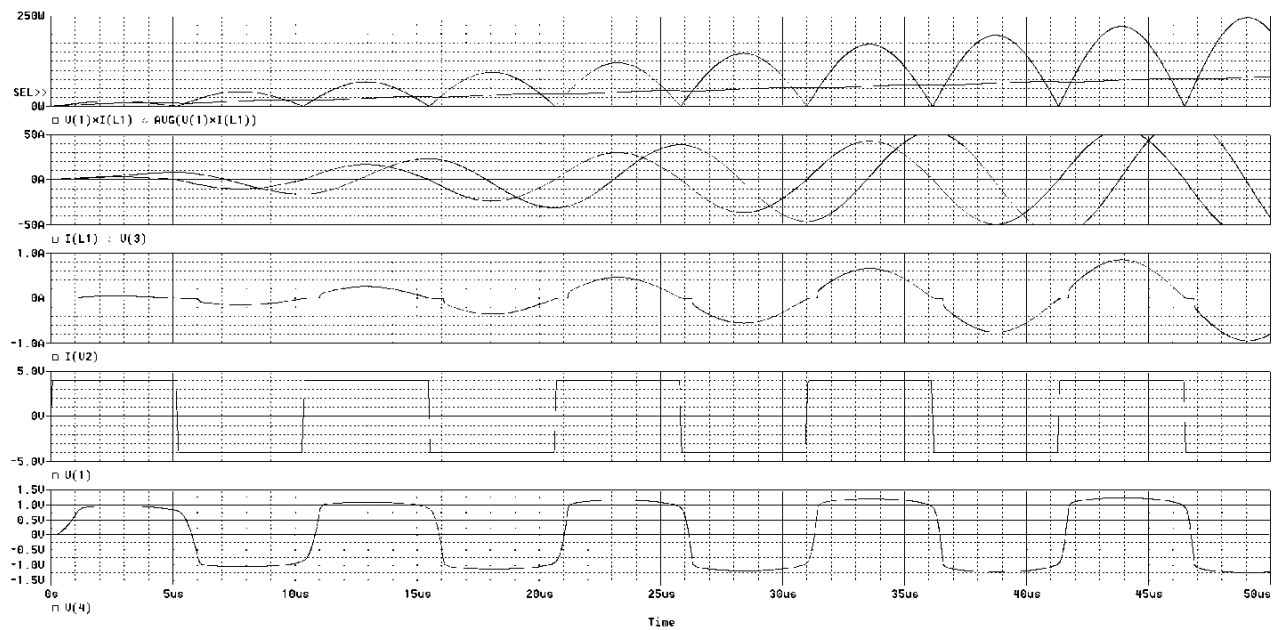


Рисунок.2.13 – Отримана осцилограма підмодуля.

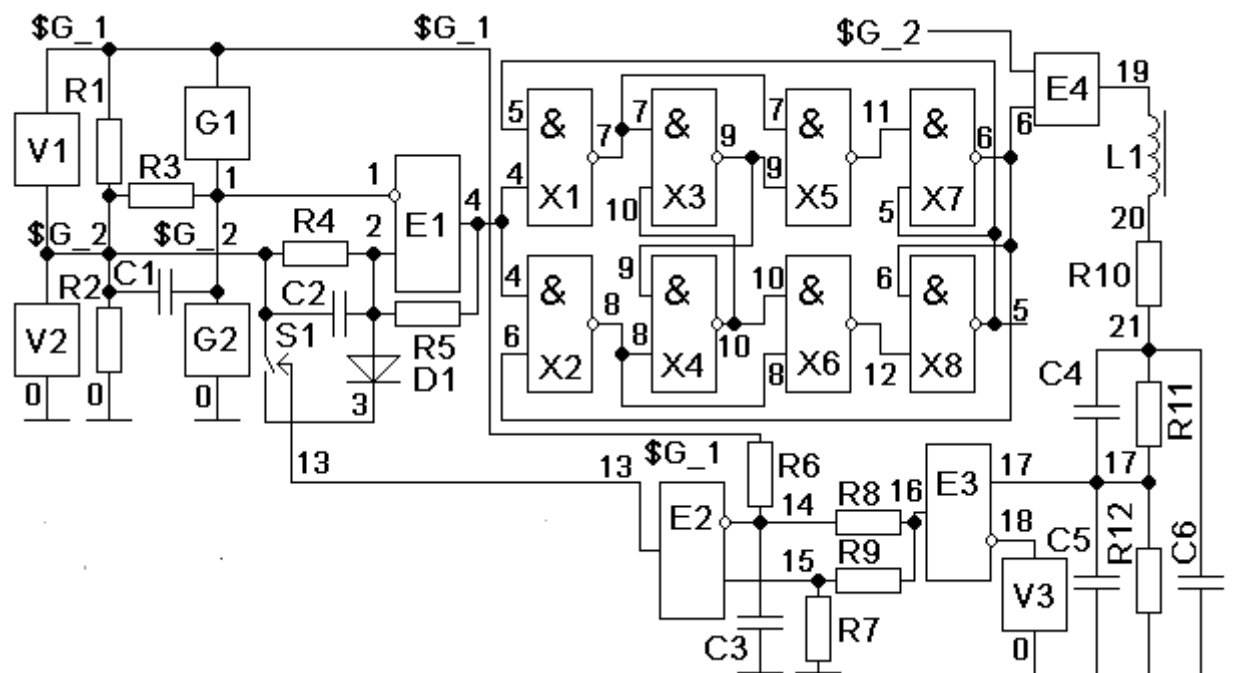


Рисунок 2.14 Симуляційне моделювання схеми інвертора з системою керування.

Проаналізувавши сигнали можемо обрати необхідні підмодулі та компоненти.

Перейдемо до складання та опису схеми інвертора

2.2 Полумостовий інвертор.

Інвертор може використовуватися автономно для гарту і плавки (в тому числі - в підвішеному стані) невеликих зразків металів і сплавів. Робочий діапазон частот 60-300 кГц. Споживана потужність - до 1 кВт в безперервному режимі і до 2 кВт - в короткочасному (15-20 хв).

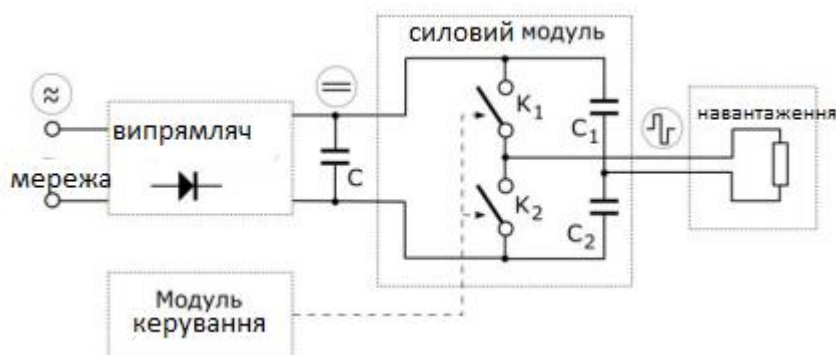


Рисунок 2.15. Блок-схема полумостового інвертора

Випрямляч

В даній реалізації інвертора це найпростіший, але і самий громіздкий вузол. Він містить великий і важкий АТР (автотрансформатор) для регулювання вихідної напруги випрямляча і один громіздкий низькочастотний розв'язує трансформатор. Вибір такого рішення обумовлений такими причинами.

1. На стадії початкового знайомства з силовою електронікою і налагодження бажано мати можливість плавно регулювати постійна напруга, що подається на ключі. Найпростіший спосіб, доступний практично в будь-якій експериментальній лабораторії - це АТР.

2. Якщо взяти за правило починати і закінчувати роботу інвертора при «нульовому» положенні АТР, то можна уникнути необхідності створення спеціальних ланцюгів для початкової зарядки великих електролітичних конденсаторів фільтра.

3. АТР має велику індуктивність, тому на перших порах можна прибрати високочастотні фільтри по ланцюгу харчування.

Оскільки силові вузли інвертора не мають гальванічної розв'язки з мережею живлення, то на перших порах її краще зробити. Хоча б для процесу налагодження, при роботі на малих потужностях. Найефективніший спосіб - живити весь інвертор через розв'язують трансформатор підходящої потужності. Природно, коефіцієнт трансформації його повинен бути близький до одиниці. Така розв'язка бажана також і для додаткової безпеки самого експериментатора при налагодженні інвертора. З урахуванням цих міркувань перший варіант регульованого випрямляча для лабораторного інвертора виходить простим. Його схема представлена на рис.2.16. Випрямляч не містить якихось дефіцитних деталей і вузлів, надійний і дуже зручний в роботі.

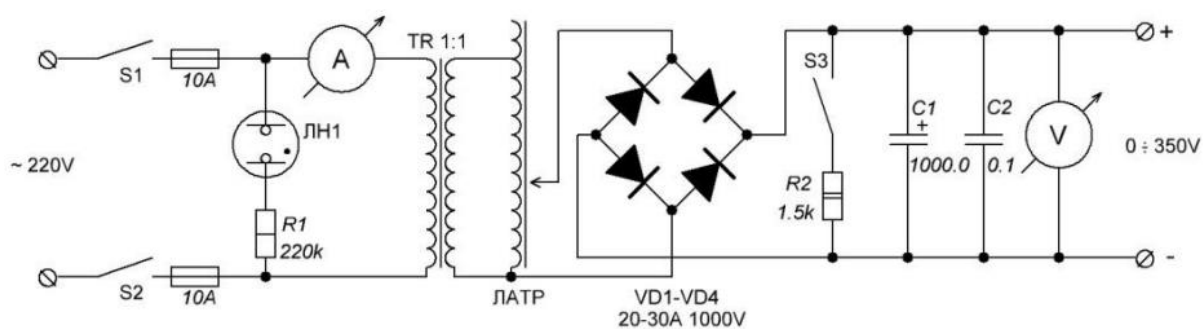


Рисунок 2.16 - Схема випрямляча

Звичайно ж, в перспективі бажано замінити такий регулятор з громіздким АТР на відповідний імпульсний регулятор. По-перше, він набагато компактніше і, по-друге, він міг би забезпечити деякий запас по

потужності (до 6-10 кВт). Однак в даному проекті головна мета - отримати реально працюючий інвертор для фізико-хімічних експериментів максимально простим способом

Силовий модуль

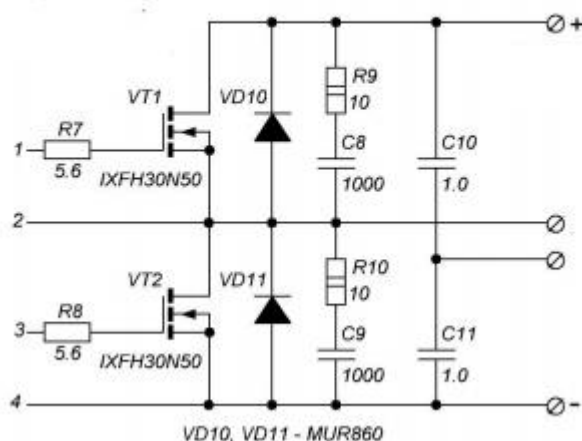


Рисунок 2.17 - Схема силового модуля

Як ключі використані транзистори IXFH30N50 фірми IXYS. Вони чомусь набагато дешевше аналогічних приладів інших виробників. Ці транзистори розраховані на струм до 30 А і робоча напруга до 500 В. Опір «витік-стік» у відкритому стані - 0.16 Ом. Можна було б поставити і менш потужні транзистори, але економія буде несуттєвою, а запас потужності ніколи не завадить. Єдиною вагомою причиною для використання транзисторів простіше було б зменшення ємності затвора і заряду, необхідного для відкриття транзистора. Але в даній розробці ми використовуємо драйвери досить потужні і для цих транзисторів. У ланцюгах затворів ми використовуємо тільки резистори R7 і R8, які обмежують струми зарядки ємностей затворів і гасять високочастотний «дзвін». В даному варіанті силового модуля ніяких додаткових елементів в ланцюгах затворів немає. Силові транзистори шунтовані поворотними діодами VD10 і VD11. В принципі, їх можна не ставити, тому що використовуються транзистори

(IXFH30N50) самі містять не такі вже погані внутрішні діоди ($t_{rr} < 250$ нс). Однак, якщо працювати на підвищених частотах (сотні кілогерц), краще поставити надшвидкі діоди типу MUR860.

Можливо збільшити потужність інвертора до 4-5 кВт. В принципі, можна збільшити потужність в два рази, практично нічого не змінюючи в схемотехніці. Для цього достатньо перейти з напівмоста на повний міст. Додасться ще один кулер з парою транзисторів з «обв'язкою» і пара додаткових обмоток на імпульсному трансформаторі блоку управління.

2.3. Мостовий інвертор. Блок схема.

Попередня конструкція, описана в пункті 2.1. , представляла собою напівміст на потужних МОП-транзисторах в якості ключів. Робочі частоти напівмоста 60-300 кГц. Споживана потужність - до 1 кВт в безперервному режимі і до 2 кВт - в короткочасному (15-20 хв).

Описуваний в даній статті інвертор є розвитком апарату, описаного в пункті 2.1 по наступними напрямками:

1. Змінено принцип регулювання потужності інвертора, що працює на резонансну навантаження. Колишній інвертор працював на фіксованій частоті (зазвичай трохи вище резонансної), а регулювання потужності вироблялося шляхом зміни напруги живлення інвертора. У даній же конструкції застосований принцип частотного регулювання потужності. Це дозволило позбутися від громіздкого регулятора напруги (АТРa).

2. Модифікований силовий модуль. У даній конструкції застосований повний міст ключів на потужних польових МОП-транзисторах. Використання мостової схеми дозволяє подвоїти напруга на первинної обмотці трансформатора і підняти рівень потужності (в даному випадку - до 2 кВт в безперервному режимі і до 4 кВт в короткочасному).

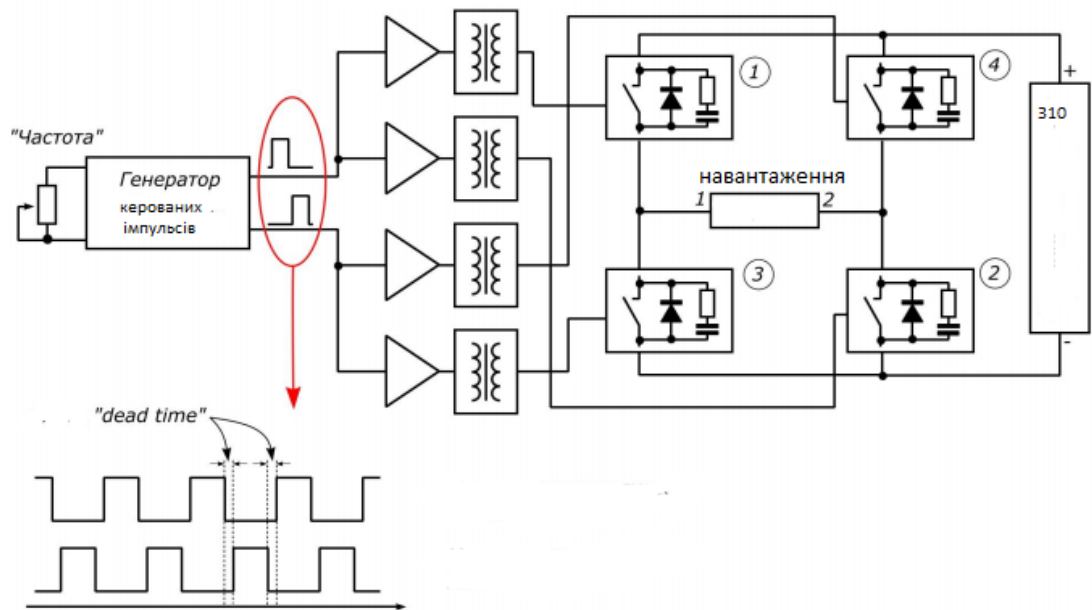


Рисунок 2.17 - Блок схема мостового інвертора

Інвертор складається з п'яти функціональних блоків. Перший блок - генератор керуючих імпульсів. Він видає дві послідовності імпульсів. Другий блок - блок драйверів, призначений для посилення сигналів і їх гальванічної розв'язки.

На виході цього блоку - чотири сигнали, які безпосередньо керують роботою ключів наступного блоку - моста ключів. До однієї діагоналі цього моста підключений четвертий блок - блок живлення моста, який являє собою безтрансформаторне нерегульоване джерело постійної напруги 310В. В іншу діагональ включена навантаження. Навантаження являє собою послідовний коливальний контур, утворений індуктором і конденсатором. Цей контур підключений до мосту через узгоджувальний трансформатор.

Нагадаємо коротко принцип роботи мостового інвертора. За допомогою керуючих імпульсів пари ключів моста 1-2 та 3-4 поперемінно відкриваються і закриваються. На першому такті, наприклад, коли відкрита пара ключів 1-2, а пара 3-4 закрита, навантаження підключена висновком 1 до плюса джерела живлення інвертора, а іншим висновком (2) - до мінуса. Після закінчення

деякого часу, рівного тривалості керуючих імпульсів, ключі 1-2 закриваються. Наступного період часу, який називається «мертвим часом» або «dead time», всі ключі моста закриті, і навантаження фактично відключена від джерела живлення. Коли закінчиться dead time, починається другий такт. Відкриваються ключі 3-4, а 1-2 залишаються закритими. У цьому такті навантаження підключена висновком 1 до мінуса джерела, а висновком 2 - до плюса. Далі знову всі ключі закриваються, та після чергового «dead time» цикл повторюється. В результаті на навантаженні виходить змінна напруга з частотою, рівній частоті слідування імпульсів, і амплітудою, близькою до напруги джерела живлення моста.

Модуль керування

Перша вимога - до модуля керування. Вона полягає в тому, що робота ключів повинна бути узгодженою, тобто вони повинні відкриватися / закриватися поперемінно і ніколи не повинні бути повністю відкриті одночасно. Це необхідно для усунення так званих «наскрізних струмів», поточних через обидва відкритих ключа, минаючи навантаження. Зазвичай це призводить до руйнування ключів. Крім цього, оскільки реальні ключі мають кінцеве (нульове) час відкриття / закриття, то відкривають сигнали модуля управління повинні подаватися з деякою затримкою після сигналу закриття іншого ключа. Ці затримки називаються «мертвим часом» (dead-time) і повинні бути передбачені в будь-якому варіанті модуля управління.

Природно, схемотехніка модуля управління визначається тим, якими ключами він буде керувати. В даному інверторі в якості ключів використовуються потужні польові транзистори з ізольованим затвором, відомі під аббревіатурою MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) або - польові МОП-транзистори (Метал-Оксид-Напівпровідник). Популярно про таких транзисторах можна почитати, наприклад, в [1].

Однак, для цього розділу досить просто представляти MOSFET як якийсь електронний вимикач, який управляється напругою на затворі (щодо витоку). В відкритому стані опір між витокom і стоком мало (в залежності від типу транзистора – від декількох Ом до сотих часток Ома), а в закритому - велике (десятки МОм і вище). Для більшості транзисторів напруга на затворі може змінюватися в межах від -20 до + 20 Вольт. якщо напруга на затворі вище порогового (поріг зазвичай від +2 до +4 В) транзистор відкривається, якщо нижче -закривається.

Таким чином, для управління ключами ми повинні подавати на затвори транзистора позитивні імпульси з напругою 12-18 В. Це повинні бути дві послідовності імпульсів, що передаються підвідом окремим керівним шинам, зрушені за часом відносно один одного (рис.2.18). як вже зазначалося вище, для усунення наскрізних струмів повинні бути передбачені паузи (dead-time).

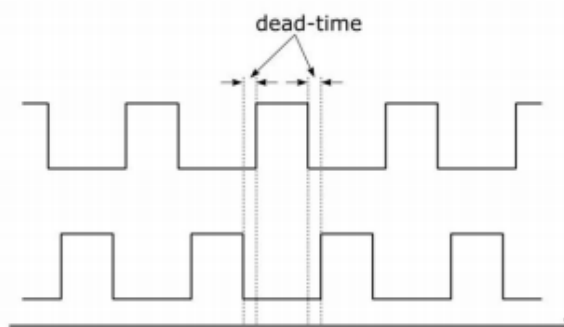


Рисунок 2.18 - Діаграми керуючих імпульсів

Існує безліч варіантів таких генераторів імпульсів. В даному проекті застосовано один з найпростіших рішень на основі поширеної і недорогий мікросхеми IR2153. Ця мікросхема є закінчений автоколебательний драйвер напівмоста для електронних баластів люмінесцентних ламп. Драйвер має фіксовану тривалість dead-time (1.2 мкс). Максимальний час наростання і спаду імпульсів 150 і 100 нс, відповідно. Тому максимальна частота імпульсів обмежена значенням 300-350 кГц. На жаль, потужність вихідних каскадів цього драйвера ($I_o + - = 200 \text{ мА} / 400 \text{ мА}$) не дозволяє його використовувати безпосередньо в якості драйвера затворів польових

транзисторів нашого інвертора. Причина в тому, що затвори потужних MOSFET-ів мають досить велику ємність (яка сягнула кількох тисяч пікофарад), тобто драйвери змушені працювати на велику ємнісне навантаження. Тому драйвери повинні видавати великі струми. Інакше час перемикання (і, отже, теплові втрати) транзисторів будуть великі. Оцінимо ці струми. В даному проекті в якості ключів використовуються транзистори IXFH30N50. Виробник декларує сумарну ємність затвор-витік і затвор-стік $C_{iss} = 5200-5700$ пФ. Однак, в дійсності реальна (ефективна) ємність затвора набагато більше. Тут для оцінки потрібно брати повний заряд, який необхідно передати затвору для того, щоб транзистор повністю відкрився. Зазвичай ця величина теж приводиться в datasheet. Для IXFH30N50 $Q_g (on) \sim 200-300$ нКл. Таким чином, для напруги затвор-витік 10 В отримуємо $C_{eff} \sim 20-30$ нФ. Це в 4-6 разів більше, ніж C_{iss} ! Для того, щоб час включення транзистора було близько 100 нс, драйвер повинен заряджати ємність затвора струмом порядку $(2-3) * 10^{-7}$ Кл / 10^{-7} сек $\sim 2-3$ А. Такий струм драйвер IR2153 видати не може. Тому в даному проекті IR2153 використовується тільки як генератор, що задає, сигнали якого потім будуть посилюватися. Схема генератора представлена на рис.2.19

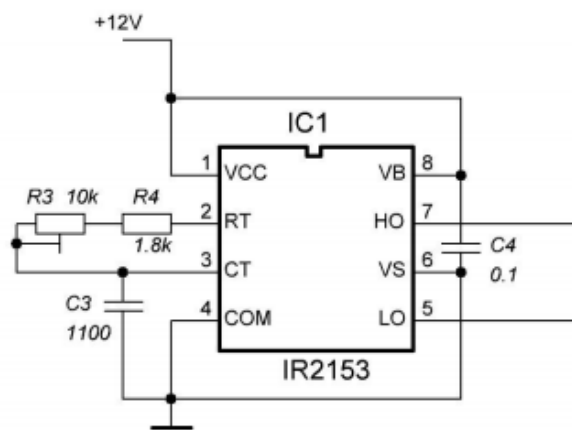


Рисунок 2.19. - Генератор керуючих імпульсів на IR2153

З вивідів 5 (LO) та 7 (HO) ми отримаємо сигнали, точно збігаються з сигналами, представленими на рис.2.18. Резистори R3 і R4 і конденсатор C3

визначають частоту генерування імпульсів. Для зазначених номіналів за допомогою резистора R3 цю частоту можна змінювати в межах приблизно від 60 до 300 кГц.

Для посилення сигналів генератора імпульсів існує безліч схемотехнічних рішень, як на дискретних елементах, так і спеціалізовані інтегральні мікросхеми. В даному інверторі був застосований не найдешевший, але зате дуже простий варіант. Були використані 6-амперні швидкі драйвери MAX4420. Природно, замість цих драйверів можна поставити продукти інших виробників або зібрати їх на комплементарних парах транзисторів (польових або біполярних). Головна умова - вони повинні бути швидкодіючими (фронти і спади - до сотні наносекунд) і забезпечувати струми кілька ампер. Однак простіше і економічніше - готові інтегральні драйвери. Схема включення драйверів MAX4420 показана на рис.2.20

Рисунок 2.20 - Фрагмент модуля керування

З виходів L і H ми отримаємо посилені керуючі імпульси

Повна схема модуля керування на IR2153

Залишилося розглянути дуже важливий і непросте питання - узгодження рівнів сигналів. Оскільки в основу силового модуля покладено напівміст, то виникає відома проблема управління верхнім плечем напівмоста.

Необхідно, щоб драйвер верхнього плеча видавав керуючі імпульси щодо землі а щодо рівня витоку верхнього транзистора. Це рівень може змінюватися протягом робочого циклу приблизно від 0 (нижній ключ відкритий, верхній закритий) до напруги живлення (нижній ключ закритий, верхній відкритий). До погодження рівнів керуючих імпульсів напівмоста Існують кілька схемотехнічних рішень для зсуву рівня сигналу верхнього плеча. Вони діляться на два класи: з гальванічною розв'язкою і без. До першого класу відносяться системи з оптичною розв'язкою і на імпульсних

трансформаторах. До другого класу відносяться, зокрема, бутстрепніе (bootstrap) схеми. Не вдаючись в деталі, зазначимо, що бутстрепніе схеми зручні при реалізації добре налагоджених рішень. Однак на стадії освоєння силової електроніки вони доставляють чимало прикрощів. Через відсутність гальванічної розв'язки при тепловому пробіі силових транзисторів часто вигорає також і весь модуль управління (аж до генератора, що задає). Тому в даній роботі використаний варіант з гальванічною розв'язкою у вигляді імпульсного трансформатора. На частотах десятки-сотні кілогерц виготовлення імпульсних трансформаторів на феритових кільцях не представляє ніяких труднощів. При наявності осцилографа немає проблем ні з коригуванням кількості витків, ні з підгонкою параметрів снабберов, що гасять паразитні викиди і осциляції. Повна схема модуля управління з трансформаторної розв'язкою представлена на рис.2.21

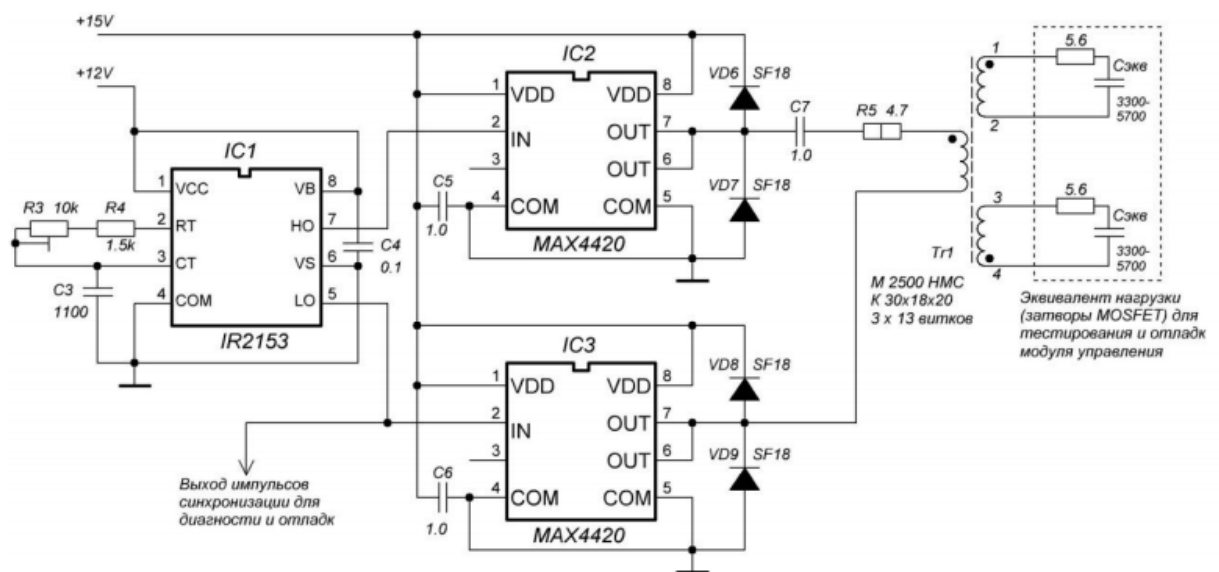


Рисунок 2.21 - Повна схема модуля управління з трансформаторної розв'язкою

Оскільки драйвери MAX4420 працюють на індуктивне навантаження, на їх виходи потрібно поставити діоди VD6-VD9. Можна використовувати будь-які швидкі діоди SF, HER, UF і т.п. Снаббер C7-R5 призначений для придушення викидів напруги при роботі на індуктивне навантаження. Крім цього, C7 видаляє постійну складову. Імпульсний трансформатор можна

розрахувати, а можна просто підібрати експериментально за формою сигналів на навантаженні, що моделює затвори MOSFET. У всьому робочому діапазоні імпульси повинні мати плоскі вершини і максимально «круті» фронти.

Висновки до розділу

Для розробки схеми було вибрано інвертор включений за схемою напівміст з регулюванням частоти.

Зроблене симуляційне моделювання сигналів та розширений аналіз схем прототипів, для вибору необхідних підмодулів та компонентів. Це було зроблено, для рішення проблем щодо коректної роботи інвертора.

Проаналізовані та вибрані відповідні прототипи, які не ускладнюють загальну схему та забезпечують коректну роботу інвертора.

Були складена та описана схема півмостового інвертора, який лежить в основі роботи індукційної печі. Інвертор складається з випрямляча, силового модуля та модуля керування. Усі вузли детально описані та представлені блок-схеми.

3. Можливі застосування керованого резонансного інвертора потужністю до 2 кВт.

Одна з основних можливостей застосування керованого резонансного інвертора це – левітаційна плавка. Це - плавка металу (алюмінію) в підвішеному стані. Іноді цей процес називають плавкою в електромагнітному тиглі або просто «левітаційною плавкою» (з англomовного терміна «levitation melting»). Тут високочастотне електромагнітне поле не тільки гріє і плавить метал, а й утримує його в просторі без якихось тиглів або обмежують стінок. Для того, щоб здійснити таку плавку, нам необхідно розробити водоохолоджувальне навантаження з індуктором спеціальної форми.

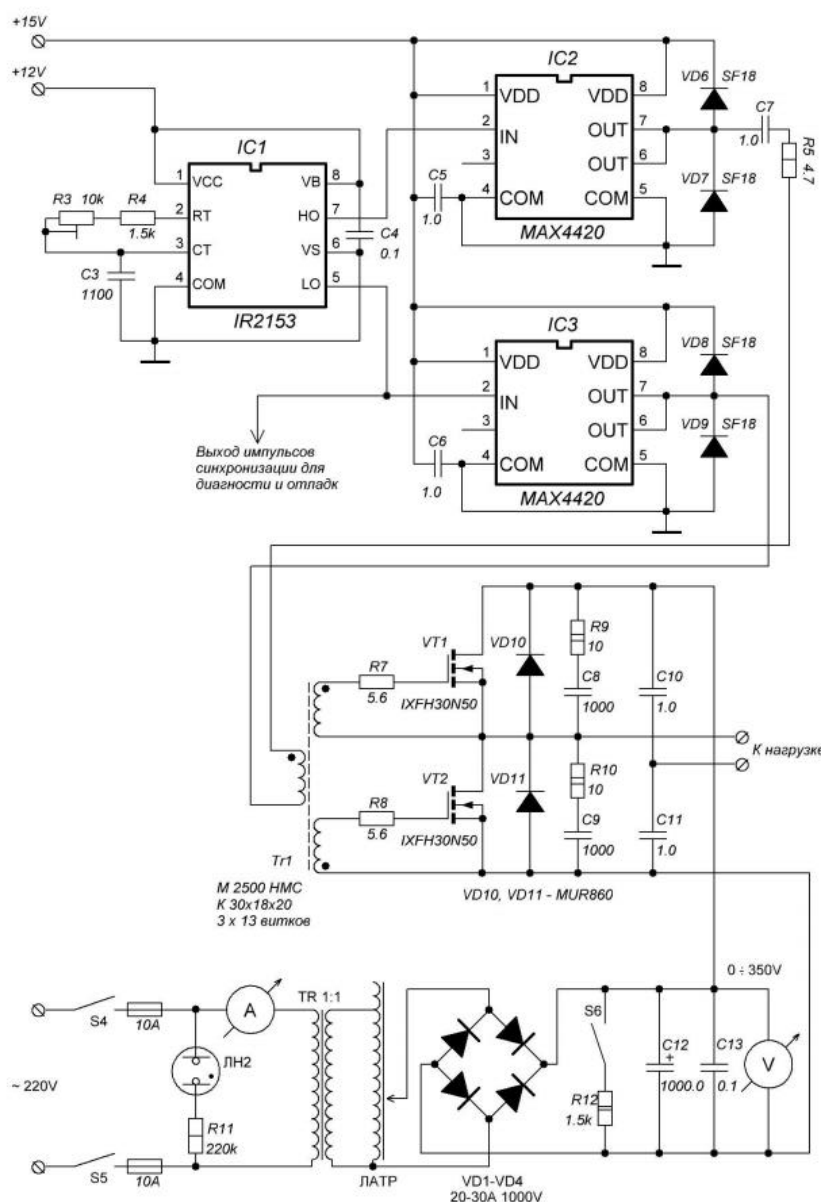


Рисунок 3.1 – Повна схема інвертора

3.1. Еквівалентна схема навантаження для індукційного нагріву та плавки

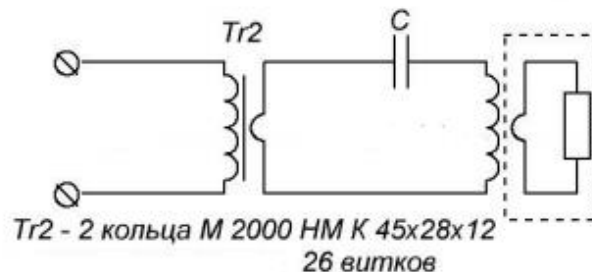


Рисунок 3.2 Еквівалентна схема навантаження для індукційного нагріву та плавки

Трансформатор TR2 виготовлений з двох кілець До 45х28х12. Марка фериту Л 2000 НМ. Первинна обмотка - 26 витків дроту МГТФ 0.75. Ця обмотка приєднується безпосередньо до виходу інвертора. Роль вторинної обмотки, що складається з одного витка, виконує одна з відвідних трубок індуктора (мідь, діаметр 6 мм), що проходить через центр кільця трансформатора.

Індуктор являє собою котушку, що містить кілька витків (мідна трубка діаметром 4 мм). Індуктор разом з конденсатором С утворює послідовний коливальний контур, на резонансну частоту якого повинен бути налаштований інвертор. Нагрівається зразок, поміщений в індуктор на еквівалентній схемі можна уявити як активний опір, індуктивно пов'язана з індуктором.

3.2 Особливості конструкції навантаження.

По-перше, в нашому коливальному контурі проходять досить великі струми (сотні ампер). Тому мідні трубки, що утворюють індуктор і підводи до нього, при великих потужностях досить сильно нагріваються. Їх потрібно обов'язково охолоджувати. Найпростіше використовувати водяне

охолодження безпосередньо з водопроводу. Оскільки в контурі є висока напруга, необхідно передбачити електричну розв'язку індуктора від водопроводу. Для цього підведення води робимо тонкими довгими діелектричними трубами. Довжина цих труб залежить від провідності водопровідної води. Провідність води в лабораторії автора становить величину порядку 100 мкСм / см , тому розв'язка у вигляді трубок діаметром близько 6 мм і довжиною 5-6 м має достатню для електричної розв'язки опір (близько 50 Мом). Бажано також контролювати і температуру охолоджуючої води. Це легко зробити за допомогою металевої вставки в зливний тракт. До неї можна прикріпити термопару, підключену до недорогого китайського тестеру, в якому є режим вимірювання температури. Дуже зручно - одразу видно, якщо забув включити воду для охолодження.

По-друге, конденсатор C коливального контуру повинен бути розрахований на досить велику реактивну потужність. Необхідно використовувати або спеціальні конденсатори для індукційного нагріву, або набирати батарею з досить великої кількості плівкових конденсатором меншої ємності, включених паралельно. В даному контурі конденсаторна батарея містить 40 поліпропіленових високовольтних конденсаторів СВВ81. Ємність кожного конденсатора - 0.033 мкФ , робоча напруга 2 кВ. Загальна ємність батареї - 1.32 мкФ . Тангенс кута втрат їх становить 0.0008. Тому на кожному конденсаторі виділяються у вигляді тепла лише десяті частки вата. Конденсатори змонтовані вільно і добре охолоджуються конвективними потоками повітря. Тому, навіть після півгодини роботи на максимальній потужності вони нагріваються незначно (на 10-20 градусів).

По-третє. Для стійкої левітаційної плавки, конструкція котушки індуктора повинна мати спеціальну форму. В даному випадку індуктор виконаний з мідної трубки діаметром 4 мм у вигляді конуса. Кут між твірною і горизонталлю дорівнює 65° . Індуктор містить чотири витка в прямому напрямку і один - в зворотному (протівовіток). Це потрібно для того, щоб

усередині індуктора була область, в якій поле менше, ніж навколо неї. Провідник, поміщений в змінне електромагнітне поле, виштовхується в область менших полів. Тому без області з мінімальним полем положення зразка всередині індуктора буде нестійким. Для левітаційного плавки невеликих зразків кінчна конструкція індуктора з протівовітком - одна з найпростіших, але ефективних.

Висновки до розділу

Розглянули одну з найважливіших можливостей застосування керованого резонансного інвертора це – левітаційна плавка. Це - плавка металу (алюмінію) в підвішеному стані. Іноді цей процес називають плавкою в електромагнітному тиглі або просто «левітаційного плавкою».

Склали еквівалентна схему навантаження для індукційного нагріву та плавки та ознайомились з особливостями конструкції навантаження.

Висновки

В даній роботі було досконало вивчено теоретичні відомості індукційної плавки, суть методу, основні параметри плавки, які впливають на ефективність роботи. Вивчення області застосування, що дало змогу переконатися у необхідності та актуальності індуктованих печей.

Також вивчена конструкція індукційної печі. Розглянуті окремо усі модулі, що входять до конструкції. Це необхідно було для створення подальшої розробки схеми інвертора, який лежить в основі роботи індукційної печі.

Для розробки схеми було вибрано інвертор включений за схемою напівміст з регулюванням частоти.

Зроблене симуляційне моделювання сигналів та розширений аналіз схем прототипів, для вибору необхідних підмодулів та компонентів. Це було зроблено, для рішення проблем щодо коректної роботи інвертора.

Проаналізовані та вибрані відповідні прототипи, які не ускладнюють загальну схему та забезпечують коректну роботу інвертора.

Були складена та описана схема півмостового інвертора, який лежить в основі роботи індукційної печі. Інвертор складається з випрямляча, силового модуля та модуля керування. Усі вузли детально описані та представлені блок-схеми.

Список необхідних модернізацій і поліпшень, які бажано провести в найближчому майбутньому:

1. Випрямляч. Замінити громіздкий регулятор напруги на що-небудь більш сучасне, компактне і головне - з запасом по потужності.

2. Модуль управління. Бажано здешевити підсилювачі і вибрати більш доступні компонент. Потрібно просто проаналізувати існуючі в великій кількості рішення і вибрати найкраще.

3. Трансформаторні розв'язки. У даній конструкції ми використовували найпростіші рішення. Підвищити якість сигналів.

4. Силовий модуль. Бажано збільшити потужність інвертора до 4-5 кВт. В принципі, можна збільшити потужність в два рази, практично нічого не змінюючи в схемотехніці. Для цього достатньо перейти з напівмоста на повний міст. Додасться ще один кулер з парою транзистор.

Список літратури

1. Семенов Б.Ю. Силовая электроника: от простого к сложному. – М.: СОЛОН-Пресс, 2005. – 416 с.
2. Мелешин В.И. Транзисторная преобразовательная техника. М. Техносфера, 2005. – 632 с.
3. Шандренко Д.А. Транзисторный регулятор напряжения.
4. Фогель А.А. Индукционный метод удержания жидких металлов во взвешенном состоянии. Л. Машиностроение, 1979. – 104 с.
5. Глебовский В.Г., Бурцев В.Т. Плавка металлов и сплавов во взвешенном состоянии. М. Металлургия, 1974. – 176 с.
6. Телегин, А.С. Теплотехника и нагревательные устройства /А.С. Телегин, В.Г. Авдеева. – М. : Машиностроение, 1985. – 248 с.
7. Ключко, С.Л. Нагрев и нагревательные устройства : в 2 ч. / С.Л. Ключко. – Тольятти : ТГУ, 2007. – Ч. 2. – 105 с.
8. Laszlo Balogh. Design And Application Guide For High Speed MOSFET Gate Drive Circuits.
9. Tong Qiang, Zhang Donglai, Wang Yi, Xu Dianguo. An Improved Isolated MOSFET Gate Driver Scheme for Wide Duty Cycle Applications.
10. Акулин А. Моделирование и расширенный анализ схем в PSpice 2017. – Электроника: НТБ, №10, 2017.
11. Сергеев А. Обзор и новые возможности OrCAD PSpice Designer 16.6-2015. – Материалы семинара.
12. Информационные материалы компании Cadence Design Systems.
13. Аркадьев В. К. Электромагнитные процессы в металлах. Ч. 2. Электромагнитное поле. М.—Л., ОНТИ, 1936. 304 с.
14. Бабат Г. И. Индукционный нагрев металлов и его промышленное применение. М.—Л., «Энергия», 1965. 552 с.
15. Богданов В. Н. Высокочастотная сварка металлов. [Библиотечка высокочастотника термиста, вып. 11] М.—Л., «Машиностроение», 1965. 66 с.

16. Богданов В. Н., Рыскин С. Е. Применение сквозного индукционного нагрева в промышленности. М.—Л., «Машиностроение», 1965. 96 с.
17. Брокмайер К. Индукционные плавильные печи. (Пер. с нем.) М., «Энер-гия», 1972. 303 с.
18. Вайнберг А. М. Индукционные плавильные печи. М., «Энергия», 1967. 415 с.
19. Вологдин В. П. Поверхностная закалка индукционным способом. Металлургиздат, 1939. 244 с.
20. Вологдин В. П. Поверхностная индукционная закалка. М., Оборонгиз, 1947. 291 с. Глуханов Н. П., Богданов В. Н. Сварка металлов при высокочастотном нагреве. М.—Л., Машгиз, 1962. 190 с.
21. Герасимов Е. П., Мартынов В. М., Сасса В. С. Жаростойкие бетоны для электропечей. М., «Энергия», 1969. 145 с.
22. Головин Г. Ф., Замятин М. М. Высокочастотная термическая обработка".
23. Кидин И. Н. Термическая обработка стали при индукционном нагреве. М., Metallurgizdat, 1952. 316 с. с ил.
24. Кирпичев М. В., Михеев М. А., Эйгенсон Л. С. Теплопередача. М.—Л., Госэнергоиздат, 1940. 292 с.
25. Лыков А. В. Теория теплопроводности. М., «Высшая школа», 1967. 599с.
26. Лозинский М. Г. Промышленное применение индукционного нагрева. М., Изд-во АН СССР, 1958. 472 с.